



Universidad Tecnológica de Pereira

**Implementación y comparación de los principales
Power Systems Stabilizers implementados en el
sistema colombiano en relación con su impacto en
la mitigación de oscilaciones inter-áreas**

Juan Camilo Cuero Grueso

Alejandro Gómez Gallego

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Pereira, Colombia

2018

Implementación y comparación de los principales *Power Systems Stabilizers* implementados en el sistema colombiano en relación con su impacto en la mitigación de oscilaciones inter-áreas

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electricista

Director:

Ph.D., MSc, Alexander Molina Cabrera

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Pereira, Colombia

2018

A ti Mamá, A ti Papá

Nunca, nunca, nunca te rindas. Winston Churchill

Agradecimientos

A nuestros padres, por ser parte fundamental de nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestros amigos y familiares, Gracias por estar siempre a nuestro lado!

A Alexander Molina, por los conocimientos compartidos, principios de investigación inculcados y el espacio de discusión!

A Héctor Lobón, Gracias por el apoyo y la confianza siempre!

Resumen

En este trabajo se proponen dos nuevas alternativas de *power systems stabilizers* (PSS's) en esquema de control global para ser empleadas en el Sistema Eléctrico de Potencia del país, teniendo como objetivo mitigar las oscilaciones inter-áreas, la propuestas fueron implementadas sobre el sistema de prueba de 2 áreas y 4 máquinas del Kundur [9], dicho sistema de prueba sirvió como base para realizar ensayos de otros modelos de PSS's utilizados en la actualidad en el sistema eléctrico colombiano, como lo son los Multibanda, Delta w, y Delta Pa sobre los cuales se obtuvieron resultados y se pudo analizar su comportamiento ante diferentes perturbaciones del sistema con el fin de aportar en el desarrollo de una metodología o herramienta para el análisis comparativo de los PSS's así como de su impacto en los sistemas eléctricos de potencia, dichos ensayos se efectuaron usando las herramientas de simulación de Matlab, dada su versatilidad que permite ver el impacto en la mitigación de oscilaciones inter-áreas.

Para el análisis comparativo se tuvieron en cuenta algunos aspectos como la respuesta del sistema en presencia de perturbaciones, considerando en todas las configuraciones de PSS's un valor óptimo de ganancia, logrando así verificar experimentalmente el correcto funcionamiento de las nuevas configuraciones de PSS's planteadas. Por otra parte este trabajo de grado propone una vía de investigación en cuanto a la mejora de los modelos y controladores empleados en los *power systems stabilizers* con el ánimo de disminuir los picos de potencia alcanzados y los cambios de amplitud en el ángulo del rotor que de alguna manera disminuyen la vida útil del sistema de generación hidráulico, afectando la señal de salida y la sincronización con el sistema de transmisión.

Palabras clave: Estabilidad de sistemas de potencia, Estabilizadores de sistemas de potencia, perturbación, multibanda, picos de potencia, inter-área, Unidades de medición fasorial, Sistemas de medición de área amplia

Abstract

In this work two new alternatives of power systems stabilizers (PSS's) are proposed in a global control scheme to be used in the Power Electric System of the country, having as objective to mitigate the inter-area oscillations, the proposals were implemented on the test system of 2 areas and 4 machines of the Kundur [9], this test system served as the basis for testing other models of PSS's currently used in the Colombian electrical system, such as the Multiband, Delta w, and Delta Pa, on these results were obtained and its behavior could be analyzed in the face of different system perturbations in order to contribute to the development of a methodology or tool for the comparative analysis of the PSS's as well as their impact on power electrical systems, The tests were carried out using the Matlab

simulation tools, given their versatility that allows to see the impact in the decrease inter-area oscillation

For this comparative analysis, some aspects were taken into account, such as the response of the system in the presence of disturbances, considering an optimal gain value in all PSS configurations, thus verifying experimentally the correct functioning of the new configurations of PSS's. On the other hand, this degree work proposes a way of research regarding the improvement of the models and controllers used in the power systems stabilizers with the aim of reducing the peaks of power reached and the amplitude changes in the angle of the rotor that some way they diminish the useful life of the system of hydraulic generation, affecting the signal of exit and the synchronization with the system of transmission.

Keywords: Stability of power systems, power system stabilizer, disturbance, multiband, power peaks, Phasor Measurements Units, Wide Area Measurements Systems

Contenido

Agradecimientos	
Resumen	
1. Introducción.....	2
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Justificación	4
1.4 Estado del Arte.....	4
2. Oscilaciones Inter-Área En los Sistemas Eléctricos de Potencia	6
2.1 Estabilidad en General y Clasificación	7
2.2 Oscilaciones Inter-Área	11
2.3 Configuraciones Empleadas Actualmente en los <i>Power Systems Stabilizers</i>	12
3. Control de Oscilaciones Usando PSS's Comunes en el Sistema Eléctrico Colombiano	14
3.1 Propuesta Clásica de Control de Kundur	14
3.2 Propuesta de PSS Global 1	15
3.3 Propuesta de PSS Global 2	17
4. Simulaciones y Resultados	18
4.1 Descripción Caso de Prueba	18
4.2 Implementación del Controlador Clásico del Kundur	19
4.3 Resultados Propuesta de PSS's Global 1	22
4.4 Resultados Propuesta de PSS's Global 2	26
4.5 Comparaciones.....	27
5. Conclusiones	29
Anexo: Sistema de Potencia de 2 Áreas – 4 Generadores [Kundur]	31
Bibliografía	32

Lista de Figuras

1. Sistema de prueba del Kundur	6
2. Diagrama de flujo respecto a la clasificación de la estabilidad.....	9
3. Diagrama Esquemático del MBPSS.....	12
4. Modelo de Control PSS Delta Pa	13
5. PSS Delta-w Básico	13
6. Esquema General de Impacto del PSS Δw en los Generadores	15
7. Esquema General de Impacto del PSS Δw en los Generadores	16
8. Esquema General de Impacto del PSS Δw en los Generadores	17
9. Potencia Transferida en Presencia de Perturbacion sin PSS's	18
10. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Delta-w y $gdw=100$...	19
11. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Delta-w y $gdw=70$	20
12. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Delta-w y $gdw=30$	21
13. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Delta-w y $gdw=10$	22
14. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Global 1 y $gdw=30$	23
15. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Global 2 y $gdw=100$..	24
16. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Global 2 y $gdw=70$	25
17. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Global 2 y $gdw=30$	26
18. Potencia Transferida en Presencia de Perturbaciones con PSS Global 2 y $gdw=10$	27

Lista de Tablas

1. Parámetros del Generador	31
2. Característica de las Cargas del Sistema	31

1. Introducción

Debido a numerosos casos de fallas en sistemas interconectados de potencia que se presentaron en la década pasada se ha venido investigando fuertemente como mitigar este tipo de problemas con el ánimo de mantener los sistemas de potencia en la región de estabilidad que permitan garantizar una seguridad y confiabilidad en el mismo. Por lo tanto es de gran importancia buscar nuevas alternativas que ayuden a evitar un colapso ante diferentes tipos de contingencias que se pueden presentar en un sistema de potencia creciente como lo es el colombiano, siendo transcendente la mejora del desempeño de los PSS que se utilizan en la actualidad.

Las estrategias orientadas a mantener la estabilidad en los sistemas de potencia interconectados se han creado teniendo como base la mejora de los sistemas de control y la obtención de una información cada vez más confiable, entregada por los mecanismos de monitoreo y medición de los sistemas de potencia, para lo cual se cuenta actualmente con técnicas de análisis de información y la implementación de los *Phasor Measurements Units* (PMU) que mejoran el desempeño de los *Wide Area Measurements Systems* (WAMS) [14-15], demostrando así en igual medida que el uso de señales remotas para el control de las oscilaciones inter-área es más efectivo [2-16]. En el contexto de lo anterior expresado, y teniendo en cuenta la falta de un estudio comparativo de las diferentes alternativas de configuración de *Power System Stabilizers* que existen en las máquinas de generación en Colombia, se determinó cuál es la más adecuada para mitigar las oscilaciones inter-área y los picos de potencia transferida. De igual manera se hizo énfasis en los efectos graves que se presentan en los sistemas de potencia interconectados debido a dichas oscilaciones y se realizó un análisis exhaustivo de los sistemas de control que se utilizan en la actualidad para contrarrestar dichos efectos.

La presentación de este trabajo se muestra en el siguiente orden: En el capítulo 2 se describe el fenómeno de las Oscilaciones Inter-Área En los Sistemas Eléctricos de Potencia y se relacionan algunas configuraciones empleadas actualmente en los *Power Systems Stabilizers*. En el capítulo 3 se presenta la propuesta clásica del Kundur para el control de oscilaciones al igual que las 2 propuestas de control global planteadas. El capítulo 4 muestra las simulaciones y los resultados obtenidos, con los cuales se realizó el análisis comparativo de los PSS's. En el capítulo 5 se presentan algunas conclusiones relevantes sobre el tema y por último se muestra en Anexos El Sistema de Potencia de 2 Áreas – 4 Generadores del Kundur y la bibliografía. Cabe notar que lo presentado en este trabajo de grado surge de la investigación de los power systems stabilizers implementados en el sistema eléctrico colombiano en relación con su impacto en la mitigación de oscilaciones inter-áreas.

1.1 Planteamiento del Problema

Es bien sabido que la ESTABILIDAD en cualquier tipo de sistema juega un papel fundamental para el correcto desarrollo o funcionamiento de un sistema, por ende es un área de gran importancia a la cual se le debe prestar la mayor atención posible. Nos enfocaremos en la Estabilidad de Sistemas de Potencia la cual contempla el análisis de la tensión, la frecuencia y el ángulo del rotor.

La estabilidad de tensión trata de mantener los valores de las tensiones de los sistemas de potencia en valores adecuados, por lo que se trata de evitar un aumento excesivo de la carga que provoque un descenso progresivo de tensión y por ende la inestabilidad del sistema.

La estabilidad de frecuencia se enfoca en la respuesta que tiene el sistema eléctrico de potencia ante grandes perturbaciones y busca mantener la frecuencia de estado estacionario en valores adecuados luego de un desbalance considerable entre generación y carga debido a dichas perturbaciones.

La estabilidad del ángulo del rotor es asociado con perturbaciones de pequeña señal y de estabilidad transitoria como lo son las oscilaciones intra-área e inter-área respectivamente. Dichas oscilaciones causan grandes cambios de amplitud en el ángulo del rotor en un gran intervalo de tiempo ocasionando la disminución de la vida útil del sistema de generación hidráulico debido a los esfuerzos mecánicos, afectando la señal de salida y por consiguiente la sincronización con el sistema de transmisión. Este proyecto pretende aportar al problema asociado a la necesidad de profundizar con estudios sobre los PSS's que pueden implementarse sobre las máquinas de generación de los sistemas de potencia.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Efectuar un estudio comparativo de los principales *Power Systems Stabilizers* implementados en el sistema colombiano en relación con su impacto en la mitigación de oscilaciones inter-áreas.

Objetivos Específicos

- Efectuar una revisión del estado del arte de las tecnologías y tipos de configuración de los Power Systems Stabilizers.
- Determinar el tipo de PSS's y valores típicos empleados en el sistema eléctrico colombiano.

- Diseñar un sistema de prueba que permita excitar los modos inter-área en un sistema de potencia de más de 5 generadores.
- Proponer configuraciones de dispositivos PSS que mejoren el desempeño de los casos analizados.

1.3 Justificación

Como primer elemento, la realización de éste proyecto aportará en la caracterización de los PSS's más usados en el sistema eléctrico colombiano. Así mismo, en el transcurso del desarrollo del mismo se acopiará información de los PSS's más usados en el sistema eléctrico colombiano.

De igual forma, éste proyecto de grado aportará en el desarrollo de una metodología o herramienta para el análisis comparativo de los PSS's así como de su impacto en los sistemas eléctricos de potencia.

El análisis se efectuará usando las herramientas de simulación de Matlab, dado que son versátiles y permiten implementar las diferentes configuraciones.

1.4 Estado del arte

En el presente estado del arte se tomaron como referencia algunos artículos que tratan en forma teórica los impactos que se tienen en la estabilidad de los sistemas de potencia debidos al problema de oscilaciones entre áreas y de igual forma los tipos de controladores utilizados para la mitigación de este problema, el cual comienza con las oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia experimentadas en los años 20 del siglo pasado [1].

Posteriormente se fueron llevando a cabo investigaciones donde se pudieron concluir algunos aspectos, como que las oscilaciones entre áreas son fenómenos dinámicos de todo el sistema cuya amortiguación depende de algunos factores como la observabilidad del sistema [2], y que dicho problema puede ser superado por medio de la implementación de sistemas de control de área amplia (WAC) [3], los cuales son capaces de proporcionar una notoria mejora en la estabilidad del sistema de potencia gracias a la información que reciben de las señales de retroalimentación enviadas desde partes remotas del mismo y que permiten al WAC enviar señales de control apropiadas a los agentes.

Recientemente los investigadores han ampliado las aplicaciones de sistemas de control de área amplia como por ejemplo el control de oscilaciones entre áreas basado en el filtro de Kalman [4], por otra parte se han agregado algunos dispositivos estabilizadores en el sistema de potencia (PSS), los cuales agregaban en un principio amortiguación para oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia (modos de oscilación local) [5], y después se siguieron llevando a cabo investigaciones que extendieron las capacidades del PSS para amortiguar inter-área PSS híbridos [6-7]. Cabe resaltar que lo anterior no resuelve por completo el problema de amortiguación de dichas oscilaciones, para lo cual se ve necesaria la

implementación de dispositivos controlados por electrónica de potencia que si proporcionen solución a dicho problema como por ejemplo los controladores de sistemas de transmisión (FACTS) los cuales se utilizan principalmente para mejorar la capacidad de utilización de los sistemas de transmisión existentes mejorando no solo el amortiguamiento de oscilaciones sino también la estabilidad transitoria y el control de voltaje [8]. El desarrollo y función de este y otros dispositivos se verán a profundidad a lo largo del proyecto.

2. Oscilaciones Inter-Áreas En los Sistemas Eléctricos de Potencia

El fenómeno de oscilaciones inter-áreas es muy común en los sistemas de potencia densamente interconectados, por lo cual se han venido trabajando fuertemente el desarrollo de tecnologías que ayuden a la solución de este problema, brindando un gran aporte a la confiabilidad de un sistema creciente en demanda.

El crecimiento de la demanda hará que se presenten constantemente cambios en las variables del sistema eléctrico que tienen un impacto directo en todo el sistema de potencia, en especial cuando es altamente interconectado.

Para el desarrollo de este trabajo se tuvo como base el sistema de prueba de 2 áreas de Kundur, en donde se ve claramente la interconexión de 2 áreas operativas de un sistema de potencia unidas por medio de líneas de conexión, formando así lo que se denomina como un sistema de potencia de área amplia [9], el cual se muestra a continuación:

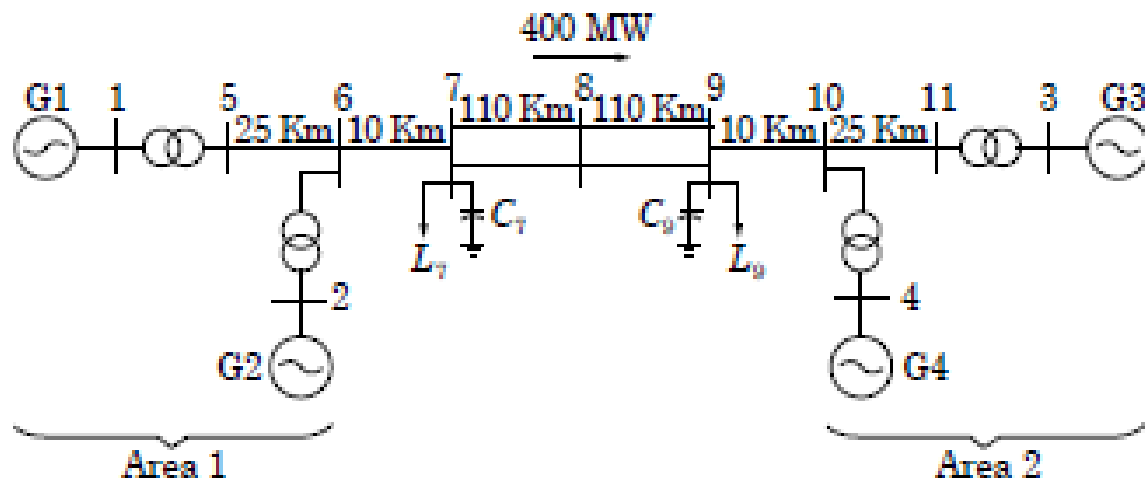


Figura 1. Sistema de Prueba del Kundur [9]

A medida que se aumentan las cargas el sistema de potencia debe ser reforzado con nuevos centros de generación, y estos a su vez deben ser interconectados para brindar mayor confiabilidad, por lo tanto es clara la importancia que tiene la implementación de PSS's en el sistema teniendo en cuenta la latencia que existe entre la señal real medida y la que le llega

al controlador, causada por la transmisión de datos a través de la red de comunicaciones y que puede llevar a tomar acciones de control erróneas [10].

2.1 Estabilidad y sus respectivas clasificaciones.

A. Conceptos básicos y definiciones sobre la estabilidad de sistemas de potencia:

- Estabilidad de sistemas de potencia.

La estabilidad de un sistema de potencia indica la capacidad que tiene éste, luego de ser asignadas las variables iniciales de operación, de recuperar un estado de equilibrio operativo después de haber sido sometido a una perturbación física. Con todas las variables del sistema delimitadas para preservar la integridad del sistema.

La integridad del sistema se conserva cuando prácticamente todo el sistema de energía permanece intacto, sin tener mayores afectaciones en generadores o cargas, excepto en aquellos aislados o desconectados por los elementos de protección del sistema, debido a fallas o maniobras intencionales para preservar la continuidad de operación del resto del sistema.

- Estabilidad como condición de equilibrio entre fuerzas adversas.

La inestabilidad se produce cuando una perturbación conduce a un desequilibrio sostenido entre las fuerzas opuestas. La inestabilidad es una situación de escape o decadencia del sistema.

- El sistema de potencia es un sistema con características altamente no lineales, que opera en un entorno que está en constante cambio.

Las cargas, salidas de los generadores, la topología del sistema y los parámetros de operación cambian continuamente.

- Dependencia de la estabilidad del sistema de potencia al momento de presentarse una perturbación.

La Estabilidad del sistema al momento de presentarse una perturbación depende de la naturaleza de la perturbación y de los valores iniciales del sistema.

- La inestabilidad puede ser causada por grandes o pequeñas perturbaciones.

Las pequeñas perturbaciones debido a cambios en la carga ocurren constantemente. Mientras, que las grandes perturbaciones pueden ocurrir debido a corto circuitos en las líneas de transmisión o subestaciones, o la pérdida de un gran generador o un nodo importante para el sistema.

- Tras una perturbación transitoria, y si el sistema de potencia es estable, alcanzará un nuevo estado de equilibrio con prácticamente todo el sistema intacto:

Cabe resaltar que una perturbación transitoria es una perturbación temporal, de poca duración y auto extingible.

Luego de una perturbación transitoria, las cargas desconectadas vuelven a ser conectadas al sistema sin modificar la estabilidad o el equilibrio de éste, retornando a la topología original del sistema con afectaciones insignificantes. Las acciones de los controles automáticos y posiblemente la acción del operador eventualmente restaurarán el sistema a su estado normal.

- Por otro lado, si el sistema es inestable, resultará en una situación de eliminación o avería; por ejemplo.

un aumento progresivo en la separación angular de los rotores de los generadores o una disminución progresiva en los voltajes.

Una condición inestable del sistema podría provocar interrupciones en cascada y el apagado de una parte importante del sistema de potencia.

B. Clasificación de la estabilidad en sistemas de potencia.

- Ventajas de elaborar una clasificación detallada de la estabilidad.

Se podrá confeccionar un análisis de problemas de estabilidad fácilmente, identificar factores esenciales que contribuyen a la inestabilidad, idear métodos para mejorar el funcionamiento estable.

- La estabilidad es clasificada teniendo en cuenta los siguientes aspectos.

- i. Naturaleza física de la perturbación que ocasionó la falla.
- ii. Tamaño o tiempo de la perturbación ocasionada.
- iii. Dispositivos, porciones del sistema y lapsos de tiempo involucrados.

A continuación, se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 2. La clasificación de la estabilidad, tamaño y tiempo de perturbación.

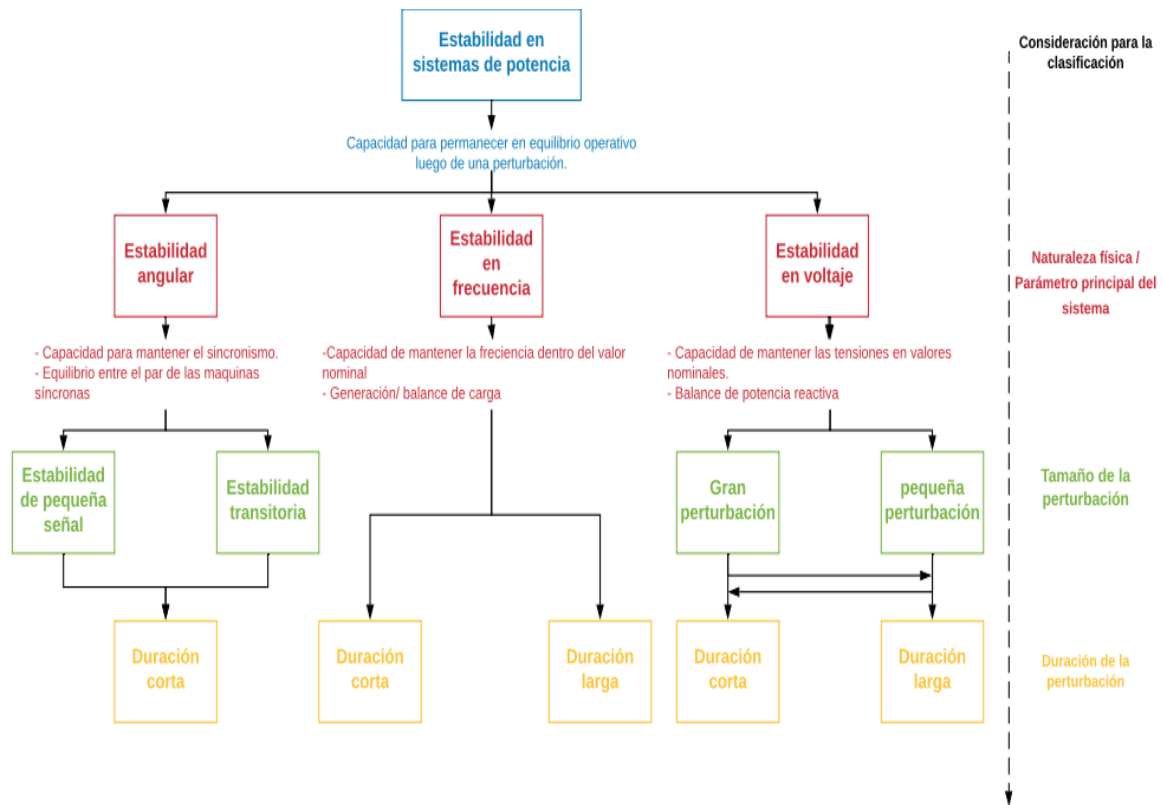


Figura 2 Diagrama de flujo respecto a la clasificación de la estabilidad.

- Estabilidad del ángulo del rotor.

La estabilidad del ángulo del rotor es la habilidad que tienen las máquinas síncronas interconectadas para permanecer en sincronismo en condiciones normales, y después de haber sido sometidas a una perturbación. Esta estabilidad depende de la capacidad de mantener el equilibrio entre el par electromagnético y el par mecánico de cada máquina. El desequilibrio entre los pares mecánico y electromagnético causa la inestabilidad entre los generadores interconectados.

Un factor fundamental en esta categoría de estabilidad es como la salida de potencia de las máquinas síncronas varía a medida que oscilan sus ángulos del rotor. Las oscilaciones angulares excesivas en magnitud y frecuencia producen inestabilidad en algunos generadores, y esto conduce a la pérdida de sincronismo entre otros generadores interconectados.

Durante una perturbación el equilibrio entre los pares mecánico y electromagnético se altera, provocando así la aceleración o desaceleración desmedida del rotor de la máquina. Entonces, se sabe que un cambio en el par mecánico o electromagnético afecta directamente al par eléctrico que es la diferencia entre estos dos, esta diferencia puede ser percibida de una mejor manera con la fórmula matemática $\Delta T_e = (T_s \cdot \Delta\delta) + (T_D \cdot \Delta\omega)$. Aquí, T_D es el coeficiente del par de amortiguación y T_s es el coeficiente de sincronización. La falta del par de

sincronización resulta en inestabilidad aperiódica, mientras que la falta del par de amortiguación produce inestabilidad oscilatoria.

La estabilidad del ángulo del rotor se clasifica en estabilidad de pequeña señal y estabilidad transitoria.

i. Estabilidad transitoria.

La estabilidad transitoria es el término que se usa actualmente para denotar la estabilidad del ángulo del rotor para una gran perturbación. Todo sistema de potencia tiene la capacidad de mantener el sincronismo cuando se es sometido a una perturbación transitoria grave, la capacidad de mantener el sincronismo es definida en gran parte por las variaciones de los ángulos del rotor en los generadores. Esta variación está influenciada por la relación del ángulo de potencia no lineal.

A continuación, exponen algunos ejemplos de grandes perturbaciones que pueden ocurrir en un sistema de potencia, por ende, son analizados por la estabilidad transitoria.

- * Grandes variaciones en los ángulos del rotor.

- * Una perturbación o falla en una línea del sistema, esta falla puede ser monofásica a tierra, bifásica a tierra o trifásica. Sin embargo, el sistema está diseñado de manera que sea estable para un conjunto seleccionado de contingencias.

ii. Estabilidad de pequeña señal.

La estabilidad de pequeña señal es la capacidad de un sistema de potencia para mantener el sincronismo en pequeñas perturbaciones. Este tipo de perturbaciones ocurren continuamente en el sistema de potencia debido a pequeñas variaciones en las cargas y en los generadores. Una perturbación es considerada suficientemente pequeña si la linealización de las ecuaciones del sistema es permisible para el análisis.

Las inestabilidades que generan las pequeñas perturbaciones pueden estar ligadas al aumento aperiódico en el ángulo del rotor, debido a la falta de par de sincronización suficiente o también, a oscilaciones del rotor de amplitud creciente, debido a la falta de par de amortiguación suficiente.

- Estabilidad de voltaje.

La estabilidad de voltaje es la capacidad que tiene un sistema de potencia para mantener voltajes constantes en todos los puntos del sistema, después de haber estado sujeto a una perturbación debido a una condición de operación dada.

La inestabilidad en el voltaje puede ser causada debido, a una perturbación, un aumento en la demanda de la carga o un cambio en la condición del sistema, estos hechos anteriores causan una caída o un aumento progresivo e incontrolable en algunos voltajes. El factor principal que causa la inestabilidad en el voltaje es la imposibilidad del sistema de potencia para mantener un equilibrio adecuado, de las acciones de control de voltaje y energía reactiva.

La inestabilidad de tensión puede traer consecuencias graves, tales como, la pérdida de carga o suministro eléctrico donde los voltajes alcanzan niveles bajos o inaceptables, También la pérdida de integridad del sistema de potencia.

- Estabilidad en frecuencia.

La estabilidad de frecuencia es la capacidad que tiene el sistema para mantener una frecuencia constante dentro de un rango nominal, después de una perturbación que resulta en un desequilibrio significativo entre la generación del sistema y la carga.

Cuando ocurre una inestabilidad en frecuencia, ocurre en forma de oscilaciones en frecuencia, estas oscilaciones producen el retiro de unidades generadoras o cargas. Adicional a lo anterior, cuando hay un pequeño sistema aislado, la estabilidad en frecuencia puede ser motivo de preocupación por cualquier perturbación que cause una pérdida significativa de carga y/o generación. Mientras que, en un gran sistema interconectado, la estabilidad en frecuencia sólo sería preocupante luego de una perturbación grave del sistema que resulte en la división del sistema en uno o más sistemas aislados. En general, los problemas de estabilidad de frecuencia están asociados con deficiencias en las respuestas de los equipos, una mala coordinación de los sistemas de control y protección.

2.2 Oscilaciones Inter-Área

Problemas Presentados e Investigaciones de las oscilaciones inter-area

Las oscilaciones inter-area solían ocurrir en situaciones aisladas. Desde mediados de la década de 1980 se empezaron a volver más comunes, por ello cada vez más este problema fue identificado en la planificación y estudios operativos. A principios de la década de 1990, se realizaron importantes investigaciones acerca de los problemas de oscilación interárea:

-Informe 296 T622 del Proyecto de Investigación de la Asociación Eléctrica Canadiense (CEA), 1993

-Informe de trabajo de oscilaciones del sistema IEEE 95TP101, 1994

-Folleto técnico de CIGRE sobre “Análisis y control de oscilaciones del sistema de potencia” preparado por TF38.01.07, 1996

2.3 Configuraciones Empleadas Actualmente en los *Power Systems Stabilizers*

A continuación se mostraran algunas alternativas que se implementan en la actualidad:

PSS Multibanda

Este tipo de tecnología se basa en técnicas de análisis de respuesta en frecuencia y permite incrementar el aporte de las bandas al amortiguamiento de los modos de oscilación, a la vez que brinda el mayor aporte de cada banda en un rango de frecuencia específico [11]. En la figura 2 se muestra la representación de un PSS de tecnología Multibanda, el cual provee amortiguamiento a las oscilaciones de baja, media y alta frecuencia por medio de 3 bandas que trabajan de forma independiente que comprenden rangos de modos de oscilación que van desde 0,01Hz a 4 Hz [12], cada una constituida por una ganancia (K_L , K_I , K_H) y bloques de compensación de fase. Cabe notar que las bandas de frecuencias baja y media tienen como entrada una señal de baja frecuencia derivada de la velocidad, mientras que la banda restante tiene como entrada una señal de velocidad de alta frecuencia que se deriva de la potencia eléctrica, ofreciendo alta flexibilidad por su diseño estructural [12].

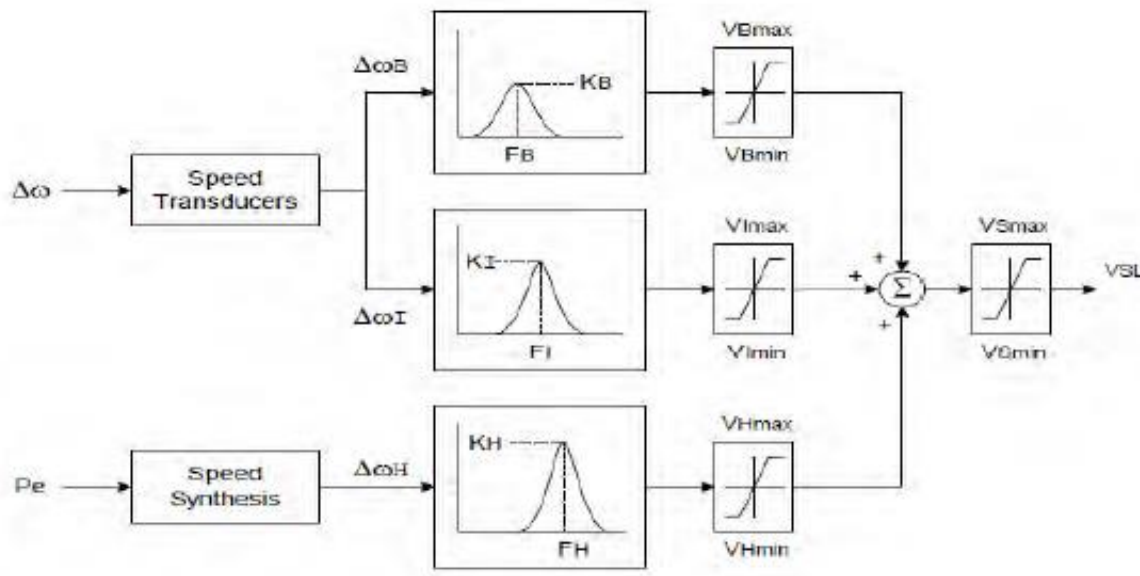


Figura 3. Diagrama Esquemático del MBPSS [13]

PSS Delta Pa

Esta configuración utiliza la potencia acelerante como señal de entrada, la cual es una resta entre la potencia mecánica de la máquina P_m y la potencia eléctrica P_e , cuyo modelo de

control se compone de la entrada, un sensor, una ganancia, un filtro *wash out*, un estabilizador de ganancia y de fase y un limitador como se muestra a continuación:

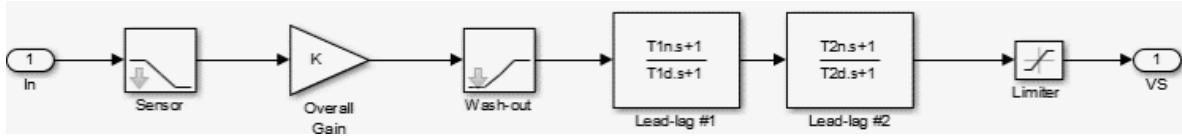


Figura 4. Modelo de Control PSS Delta Pa

PSS Delta w

Esta configuración utiliza como señal de entrada la velocidad del ángulo del rotor y se basa en el siguiente sistema de control:

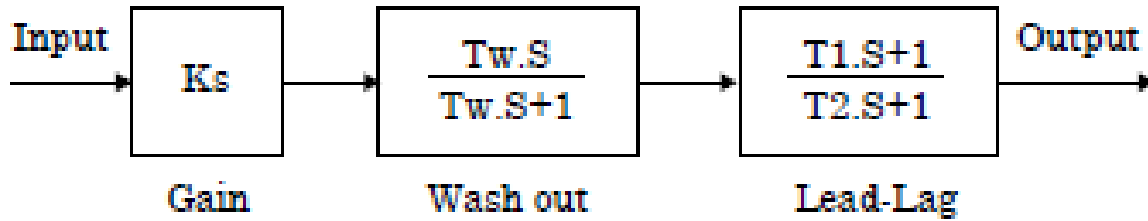


Figura 5. PSS Delta w básico [9]

La figura 4 muestra el sistema de control básico planteado en el Kundur para esta configuración, por lo tanto, con el ánimo de aportar en el desarrollo de una metodología o herramienta para el análisis comparativo de los PSS's así como de su impacto en los sistemas eléctricos de potencia se tomará como referencia dicha configuración, cuya función de transferencia se presenta a continuación:

$$H_{pss} = \frac{Ks * Tw(T1 * S + 1)}{(Tw * S + 1)(T2 * S + 1)} \quad (1)$$

Las variables que se presentan en la función de transferencia dependen directamente del sistema de potencia y los parámetros de la máquina [9], por lo cual se plantearán unas condiciones iniciales en el sistema de prueba para posteriormente ir variando e identificando el comportamiento del PSS.

3 Control de Oscilaciones Usando PSS's Comunes en el Sistema Eléctrico Colombiano

3.1 Propuesta Clásica de Control de Kundur (Delta-Omega Stabilizer)

Esta propuesta está basada en la señal de velocidad del eje y es utilizada con éxito desde mediados de la década de 1960, presentando algunas aplicaciones a unidades hidráulicas que aportan a la minimización de ruido, ya que el nivel de ruido por debajo de 5 Hz debe ser mayor a 0.02% y la desviación del eje (movimiento lateral) produce los componentes de ruido más significativos.

Por otra parte el ruido de baja frecuencia no puede ser eliminado por los filtros convencionales; La eliminación debe ser intrínseca en el método de medición de la señal.

Las salidas de velocidad se suman desde varias ubicaciones en el eje y el estabilizador desconectado en posiciones de puerta por debajo del 70%, logrando prevenir los efectos de las vibraciones de la turbina en la apertura parcial de la puerta.

Aplicación a Unidades Térmicas:

- El estabilizador puede causar inestabilidad de las oscilaciones torsionales.
- La velocidad debe ser detectada en los nodos de los modos torsionales; requiere filtros torsionales

Desventajas del estabilizador Delta-Omega:

- Se necesita archivador. Esto puede introducir un desfase en las frecuencias más bajas y desestabilizar el modo de excitación.
- Impone un límite máximo en la ganancia del estabilizador.
- Se requiere un diseño personalizado para cada unidad para lidiar con los modos de torsión.

Cabe notar que debido a las desventajas que presenta el estabilizador Delta-Omega se desarrolló el estabilizador Delta-P-Omega para superar estos problemas.

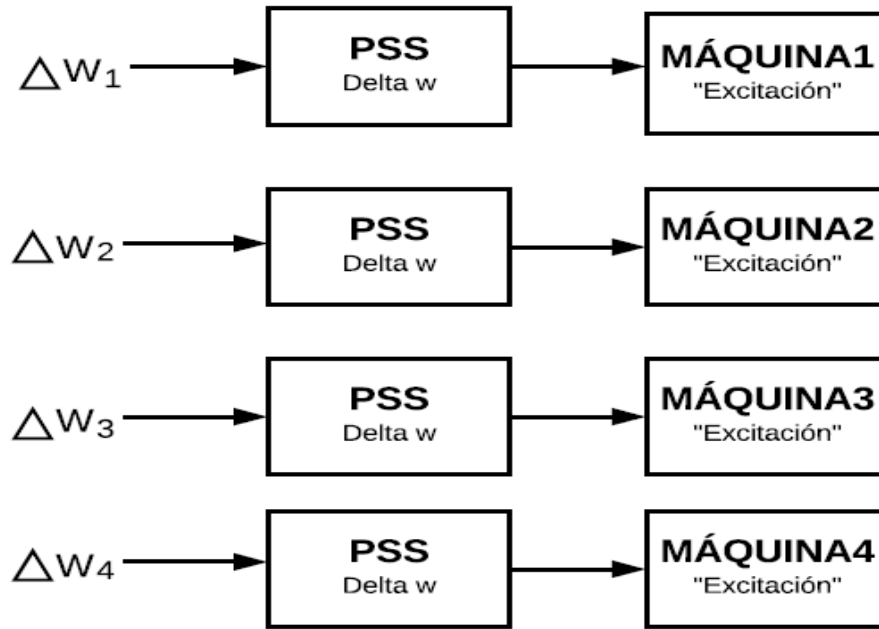


Figura 6. Esquema General de Impacto del PSS Δw en Los Generadores

3.2 Propuesta de PSS Global 1 (Gomez&Cuero 1)

En esta propuesta de control se toma cómo principal protagonista el PSS (power system stabilizer) delta w , ya que la intención primordial era reducir el sobrepaso en la señal de potencia, luego de elaborar pruebas con perturbaciones a diferentes PSS, el que ofreció un mejor desempeño fue el PSS delta w . por tal razón se decide innovar en éste.

La principal mejora que se tiene respecto al modelo clásico de Kundur, es la recepción de una señal global por parte del PSS, es decir, un PSS que obtenga información sobre las señales de todos los generadores interconectados, para este caso la señal de la velocidad en el rotor. La recepción de las diferentes señales por parte de los PSS's es de gran ayuda, ya que los PSS's de otras áreas no estarán tan faltos de información frente a una perturbación, sino por el contrario ayudarán a mitigar fácilmente la perturbación sin causar inestabilidades en el sistema.

A continuación, se hace una descripción pequeña. Primero, se refieren las señales de los otros generadores diferentes al área de estudio, para este caso la señal a analizar es la velocidad del rotor. Segundo, cada señal es multiplicada por una constante de participación, tercero, se implementa un sumador para obtener el resultado de todas las señales multiplicadas por sus respectivos valores de participación, cuarto, la señal obtenida en el paso tercero atraviesa el PSS delta omega, por último, la señal resultante ingresa en la máquina, tomando acciones sobre ésta para reducir los impactos frente a una perturbación. Esta descripción puede ser observada a mas detalle en la figura 7.

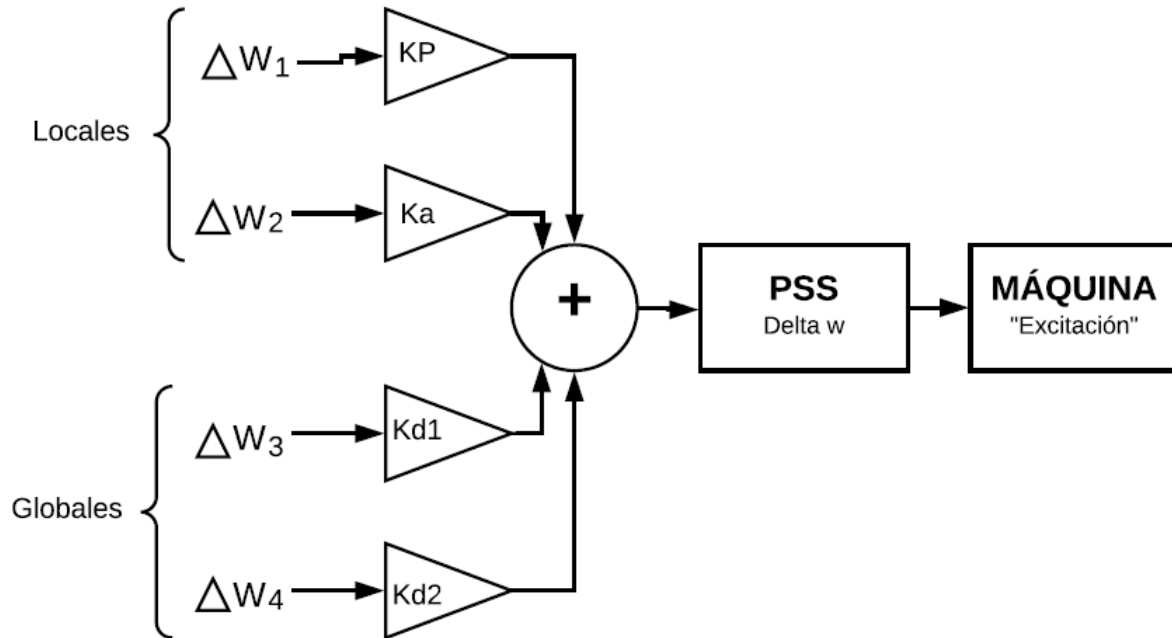


Figura 7. Diagrama de bloques para una sola máquina implementado por la propuesta Gomez&Cuero 1.

Las constantes de participación como son llamadas anteriormente pueden ser observadas en la figura 7 como, Kp, Ka, Kd1, Kd2. Los valores de estas constantes fueron seleccionados con base en algunos valores usados en [15]. En el documento citado anteriormente estos autores recomiendan una serie de limitaciones al momento de elegir el valor de las constantes para una interacción global de PSS. En el documento de control robusto se expresa que las constantes deben estar entre 0 y 1 si la señal es obtenida de la misma maquina en estudio, de lo contrario la constante debe estar entre 0.6 y 1.

$$k_{ij} = \begin{cases} 0 \leq k_{ij} \leq 1 & \text{si } i \neq j \\ 0.6 \leq k_{ij} \leq 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Siendo i la máquina donde es extraída la señal, y j la máquina que está en estudio.

Los valores recomendados para las constantes de participación son:

$$K_p=0.7$$

$$K_a=0.3$$

$$K_{d1}=-0.3$$

$$K_{d2}=-0.3$$

3.3 Propuesta de PSS Global 2 (Gomez&Cuero 2)

Esta propuesta de control es muy similar a la anterior Gomez&Cuero 1, ya que se tiene en cuenta las señales de la velocidad del rotor de todas las máquinas generadoras, es decir, un PSS global, sólo que en esta propuesta se hace una diferencia entre áreas, es decir se agrupan las señales de la misma área y se modifican con un PSS independiente.

Esta propuesta también se centra en el sobrepaso de la señal de potencia. A comparación de la anterior tiene una mejora notoria. Esta propuesta tiene una disminución de aproximadamente 10MW en el sobrepaso.

Esta propuesta se implementó tomando la señal del rotor de todas las máquinas, y referenciándola a la máquina que está en estudio. Luego se aíslan las señales de diferentes áreas y se agrupan las de la misma, llamando las señales de la misma área como señales locales, y de diferente área como señales globales. Después, se suman las señales locales entre sí, y también las globales respectivamente. Luego de hacerse la adición entre las señales de la misma área, esta señal resultante es receptada por cada PSS independiente. Luego que las señales son atravesadas por los PSS's, son multiplicados por dos constantes de participación. Estos valores se seleccionaron de igual forma que en la propuesta anterior, basados en el documento [15]. finalmente, las señales resultantes son sumadas e ingresadas a la máquina generadora, para un mejor entendimiento visualizar la figura 8.

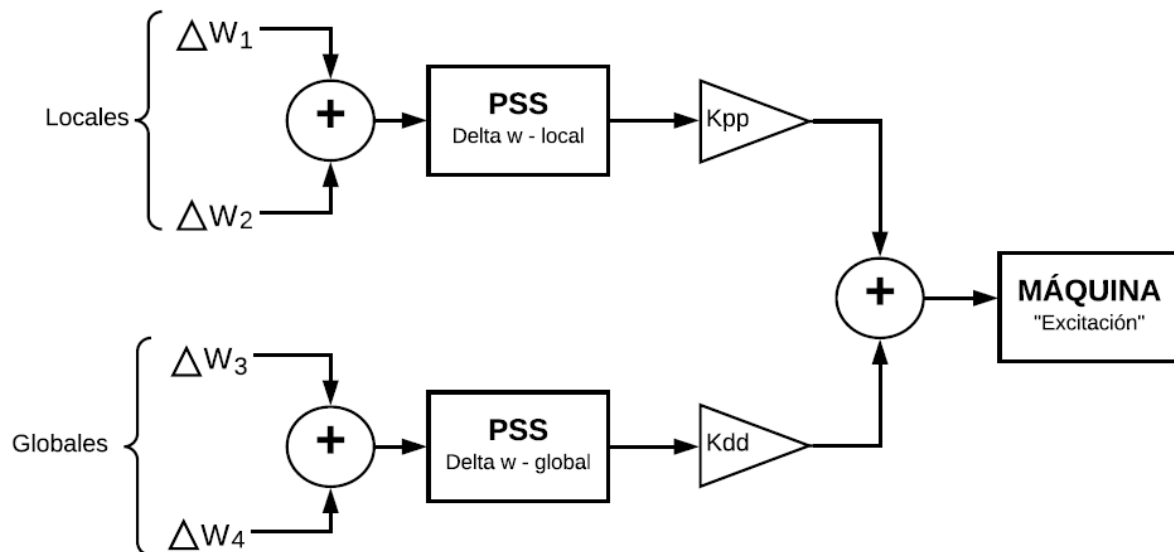


Figura 8. Diagrama de bloques para una sola máquina implementado por la propuesta Gomez&Cuero 2.

Los valores recomendados para las constantes de participación son:

$$K_{pp} = 0.6$$

$$K_{dd} = -0.4$$

4 Simulaciones y Resultados

4.1 Descripción Caso de Prueba

El sistema de prueba implementado es el de 2 áreas del Kundur [9] que se muestra en la figura 1, el cual tiene un par de líneas de 220 km de conexión entre áreas, cada área cuenta con 2 generadores cuya tensión y potencia nominal son de 20KV y 900MVA respectivamente, las cargas representan una potencia consumida de $L7=967\text{MW}$ y $L9=1767\text{MW}$.

Para el análisis se utilizó como herramienta Simulink de Matlab y se hizo especial énfasis en la potencia transferida desde el área 1 hacia el área 2, por medio de las líneas que interconectan ambas áreas. Para este caso de condiciones de operación normales se simuló una falla trifásica a tierra a la mitad de una de las líneas de transmisión. Dicha falla tiene una duración de 0,2s y se presenta en $t=1\text{s}$, para lo cual las protecciones actúan a los 83ms de ocurrida la falla, dejando en funcionamiento solo una de las líneas.

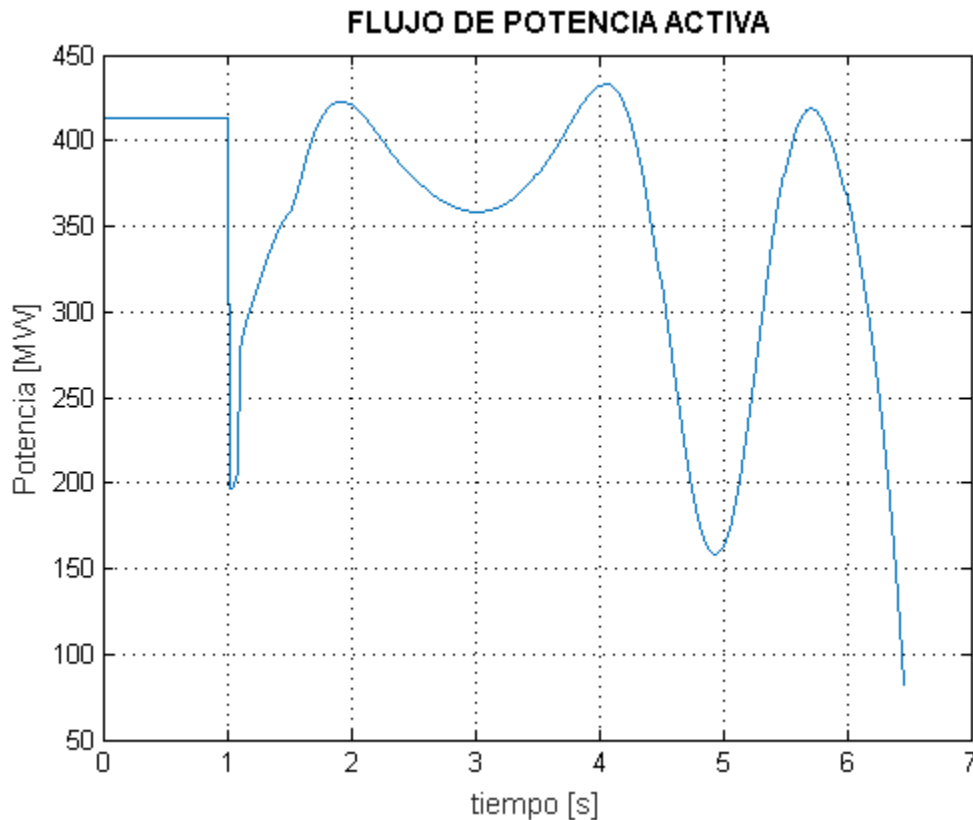


Figura 9. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones sin PSS

La figura 9 muestra el comportamiento del sistema sin ningún tipo de control ante una perturbación, se puede notar que aunque dicho sistema trata de recuperar su estado de operación nominal, este se vuelve inestable, obteniendo en $t=4,05s$ un pico máximo de potencia transferida igual a 433MW.

4.2 Implementación del Controlador Clásico del Kundur

Para analizar en detalle el comportamiento del sistema controlado con esta configuración se procedió a variar el valor de la ganancia gdw , logrando obtener un valor óptimo para la misma.

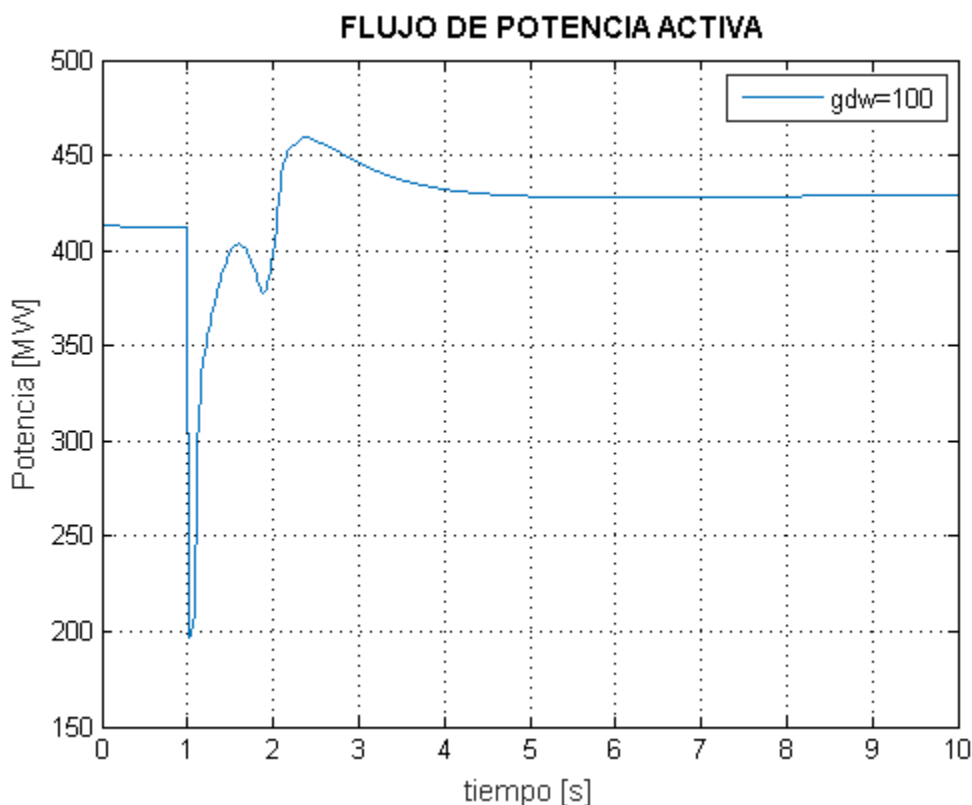


Figura 10. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Delta-w y $gdw=100$

En la figura 10 se puede apreciar que para una ganancia de 100 se obtuvo una respuesta del sistema con un pico máximo de potencia igual a 460MW en $t=2,39s$. Este incremento en el flujo de potencia podría significar la activación de las protecciones del sistema, por lo cual es importante encontrar un valor de ganancia más adecuado de tal forma que reduzca el pico de potencia y mejore la respuesta del sistema.

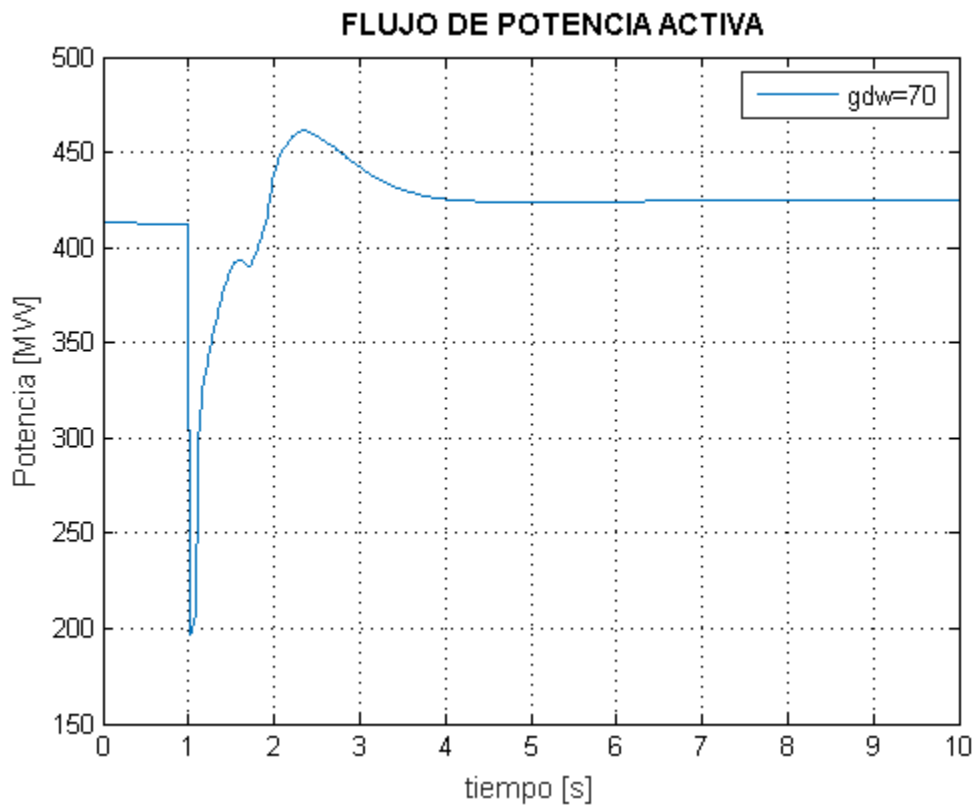


Figura 11. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con $gdw=70$

La figura 11 muestra que al disminuir la ganancia se obtiene una mejor respuesta en el comportamiento de la señal del flujo de potencia transferido, pero en esta ocasión se obtuvo un incremento en el valor pico de potencia, el cual asciende a 461MW en $t=2,35s$.

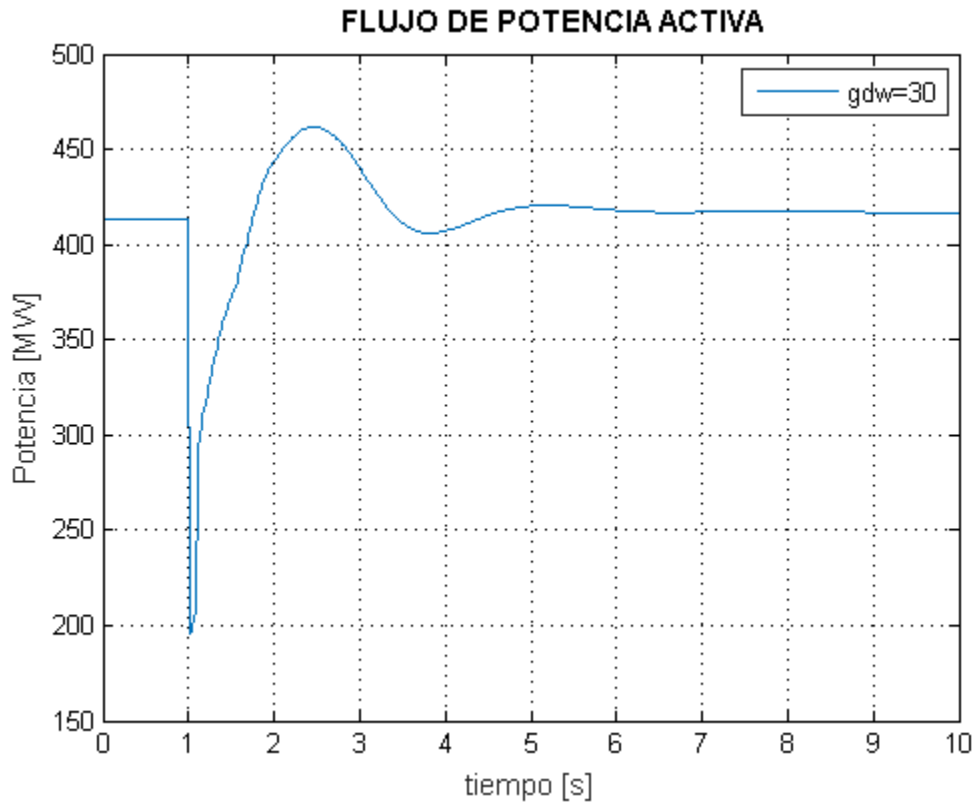


Figura 12. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con $gdw=30$

Con un valor de ganancia igual a 30, la figura 12 muestra un mejor comportamiento en la respuesta del sistema ante la misma perturbación, lo cual demuestra el correcto funcionamiento del PSS en configuración Delta w con este valor de ganancia, logrando una señal sin mayores fluctuaciones y un tiempo de estabilización $t_s=7s$, pero cabe notar que el valor del pico de potencia sigue teniendo un valor significativo, por lo cual sigue siendo necesario realizar una propuesta que ayude a tener una estabilización del sistema en un menor tiempo con unos valores de potencia pico inferiores a los obtenidos con esta configuración, de tal forma que se evite una activación innecesaria de las protecciones que pueda aislar los dos sistemas.

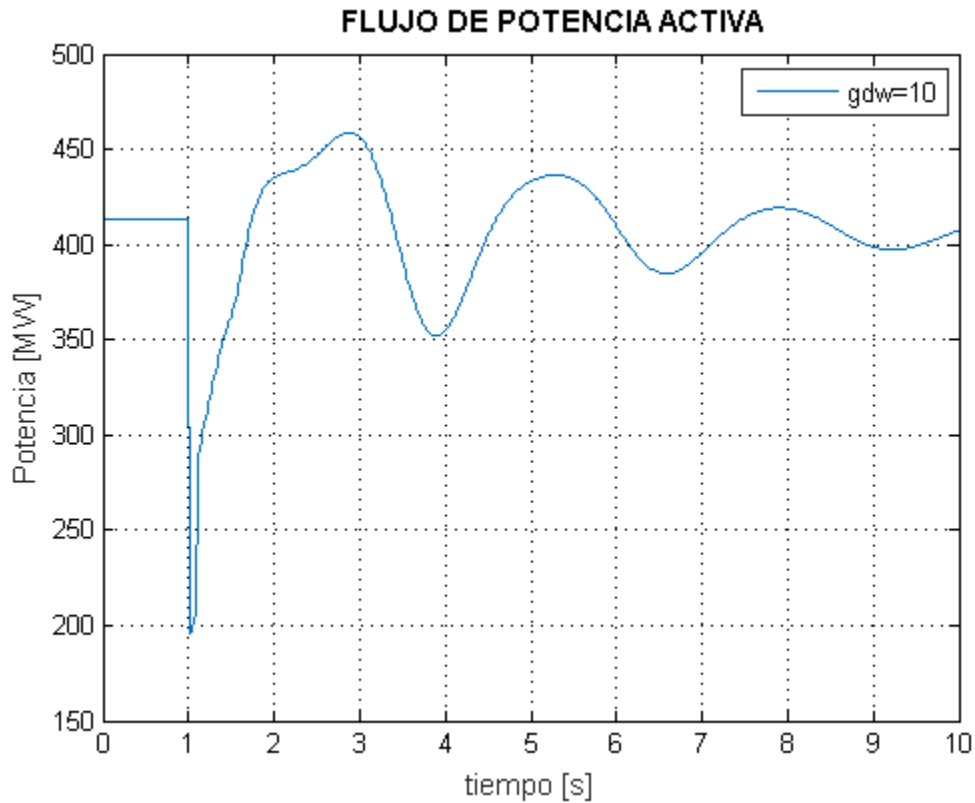


Figura 13. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con gdw=10

Como se puede observar en la figura 13 al seguir disminuyendo el valor de la ganancia del PSS también se obtiene la estabilización del flujo de potencia transferido entre las dos áreas, pero en esta ocasión lo hace en un tiempo mayor a 10s con un incremento en el número de fluctuaciones, demostrando un impacto negativo en el comportamiento de la señal en comparación con el obtenido anteriormente con gdw=30, por lo tanto se ratifica que dicho valor se puede considerar como un valor de ganancia óptimo para el controlador.

4.3 Resultados Propuesta de PSS's Global 1 (GOMEZ&CUERO 1)

Para el desarrollo y planteamiento de esta propuesta se tuvo como objetivo principal disminuir el pico de potencia transferida entre áreas que se obtuvo en la configuración Delta w del *Power System Stabilizer* presentada anteriormente, por lo cual con el ánimo de desarrollar una metodología o herramienta para el análisis comparativo de los PSS's al igual que su impacto en los sistemas eléctricos de potencia, se consideraron las mismas condiciones de operación y la misma perturbación en el sistema de prueba.

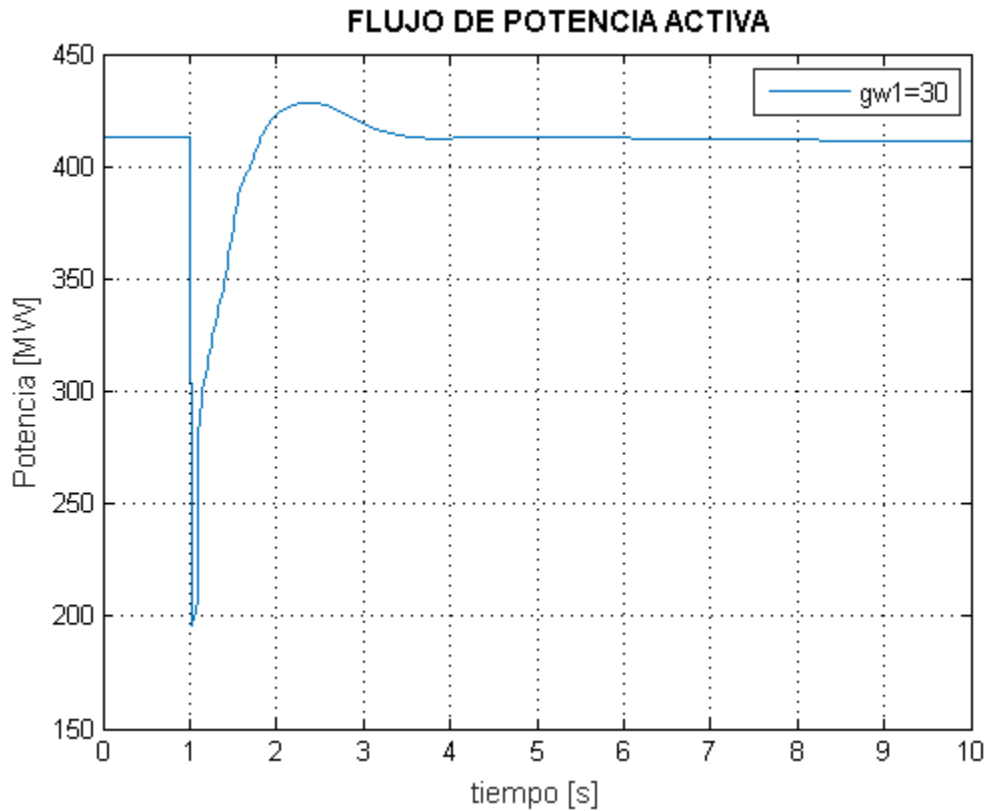


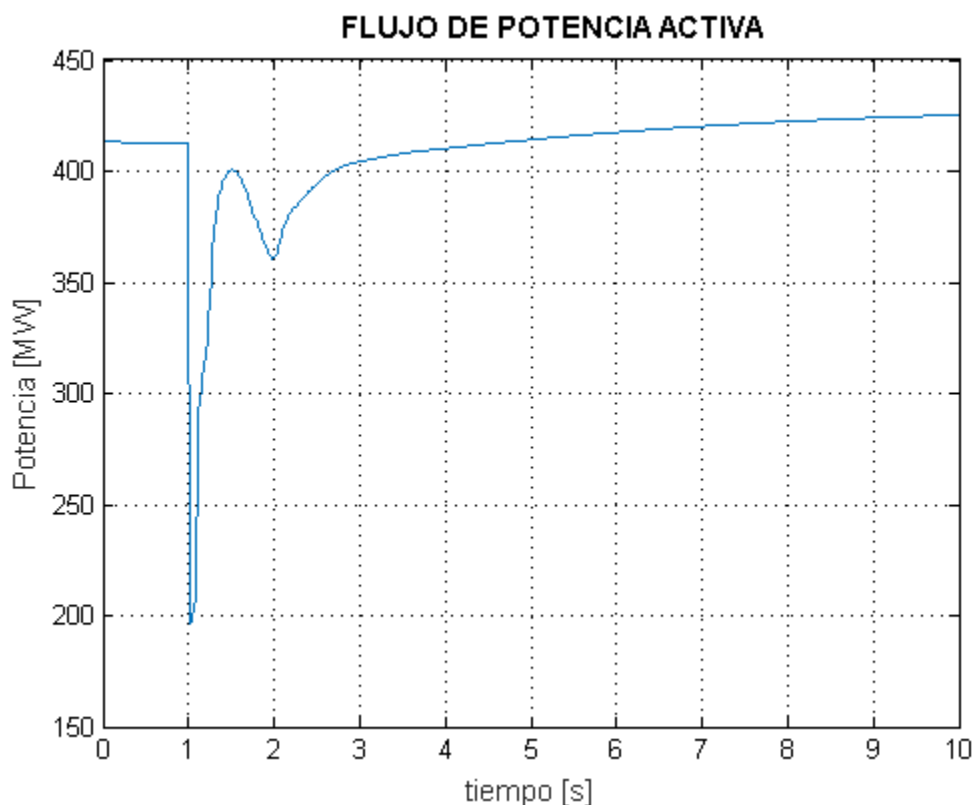
Figura 14. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Global 1 $gw1=30$

En la figura 14 se puede notar que para el valor de ganancia óptimo igual a 30 la señal obtenida no presenta mayores fluctuaciones, y se tuvo una disminución considerable en el valor pico de la potencia transferida entre áreas, cuyo valor desciende a 428MW en $t=2,4s$ y un tiempo de estabilización $ts=3,5s$.

4.4 Resultados Propuesta de PSS's Global 2 (GOMEZ&CUERO 2)

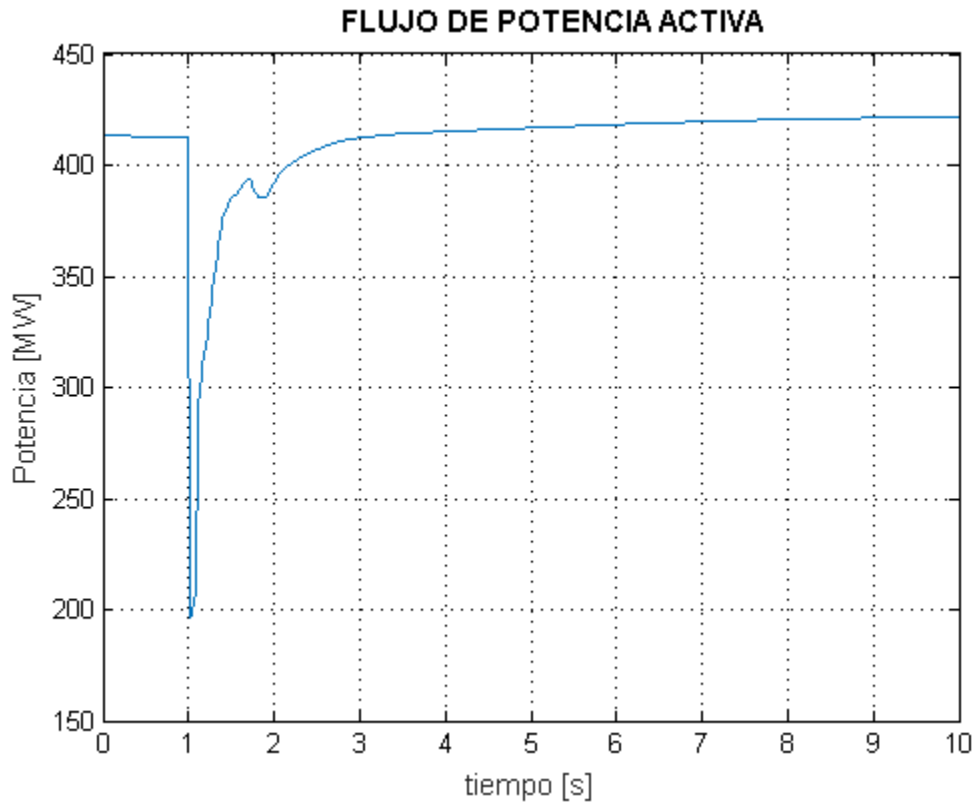
Para el desarrollo y planteamiento de esta segunda propuesta se tuvo de igual forma el objetivo de disminuir el pico de potencia ante la presencia de una perturbación, tomando como base la configuración Delta w del PSS presentada anteriormente, por lo cual teniendo en cuenta las consideraciones y condiciones de operación de la primera propuesta PSS Global 1 con el valor de ganancia óptimo se realizó la simulación de esta propuesta en el sistema de prueba planteado, obteniendo el siguiente resultado.

Del mismo modo como se realizó en la simulación de la configuración Delta w se procederá a variar el valor de la ganancia del controlador para hacerle un seguimiento detallado al comportamiento del sistema ante la falla presentada.



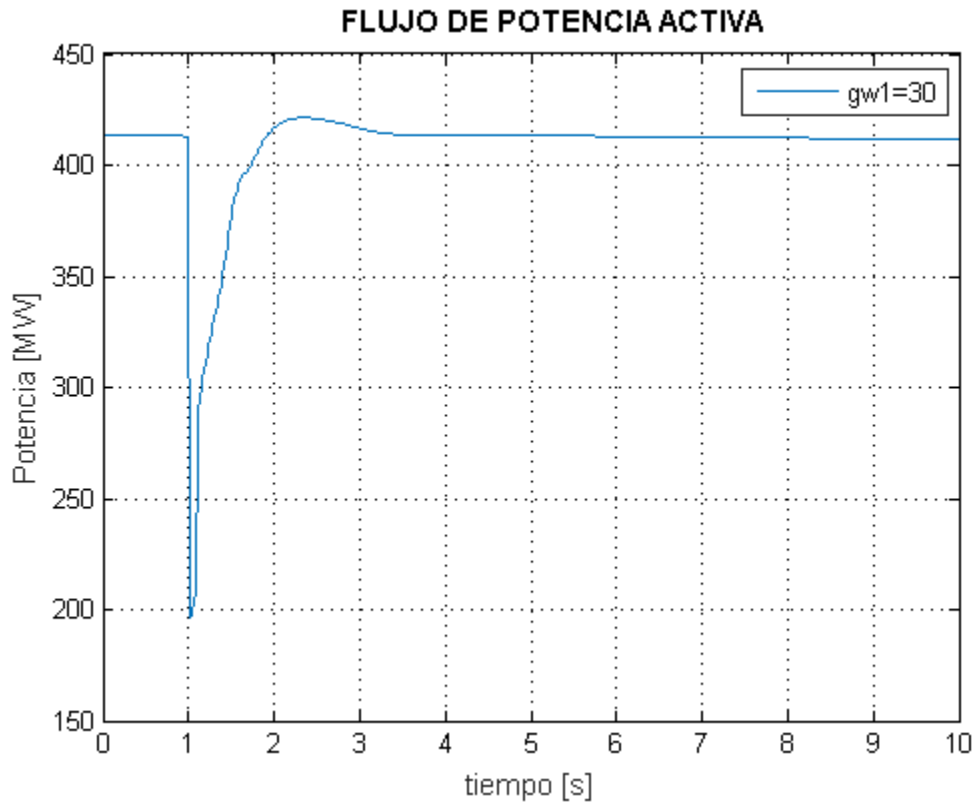
**Figura 15. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Global 2
gw1=100**

La figura 15 muestra que en esta nueva propuesta para una ganancia igual a 100 del sistema de control, se obtiene un tiempo de estabilización mayor a 10s y un valor pico de potencia menor al que se tiene en condiciones normales de operación.



**Figura 16. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Global 2
gw1=70**

En la figura 16 se puede notar que con una disminución de la ganancia se logró una mejora en el comportamiento de la señal luego de ocurrida la perturbación. Por lo anterior se puede concluir que la disminución de la ganancia en este caso tuvo un impacto positivo pero no suficiente, debido a que la señal de respuesta del sistema ante la perturbación aún cuenta con fluctuaciones significativas.



**Figura 17. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Global 2
gw1=30**

En la figura 17 se puede notar que en nuestra propuesta de PSS también se tiene un valor óptimo de ganancia igual a 30, ya que la señal obtenida no presenta mayores fluctuaciones, con un valor pico de potencia igual a 421MW en $t=2,35s$ y un tiempo de estabilización $t_s=3,2s$.

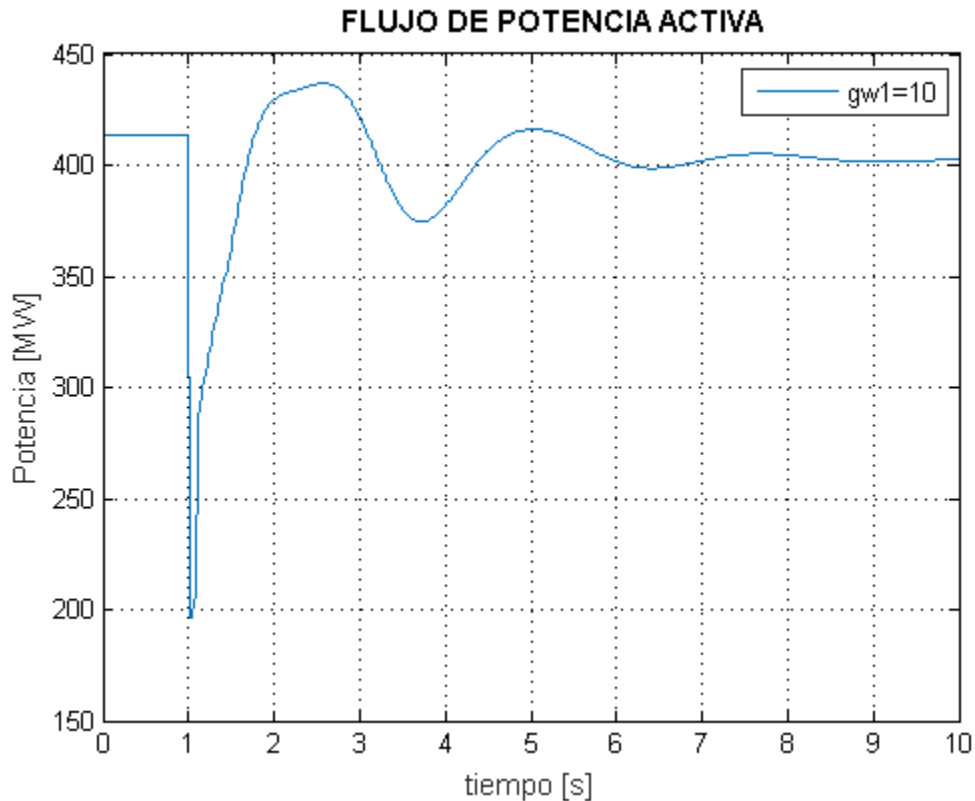


Figura 18. Potencia Transferida en presencia de perturbaciones con PSS Global 2 gw1=10

Al igual que los resultados de la configuración clásica Delta w presentados anteriormente, la figura 18 muestra como al seguir disminuyendo el valor de la ganancia se obtuvo un mayor tiempo de estabilización y un incremento en el número de fluctuaciones con respecto al valor de ganancia anterior gw1=30, por lo cual se ratifica tal valor de ganancia como el óptimo a utilizar en el PSS.

4.5 Comparaciones

Al observar detalladamente el comportamiento de la señal de potencia transferida entre áreas del sistema de prueba planteado en presencia de perturbaciones se puede concluir que el valor de ganancia adecuado para el controlador es igual a 30, puesto a que tanto en la configuración Delta w como en las 2 propuestas planteadas se reflejó una respuesta sin mayores fluctuaciones. No obstante, Aunque para algunos valores de ganancia en la configuración Delta w se tuvieron tiempos de estabilización menores para ganancias altas, por falta de respuesta del PSS se obtuvieron fluctuaciones, causando una nueva caída en el flujo de potencia antes de estabilizarse.

En el caso de las nuevas propuestas se obtuvieron tiempos de estabilización altos, disminuyendo a medida que se acercaba la ganancia al valor óptimo, A continuación, se mostrará en detalle la diferencia en los picos de potencia de una configuración con respecto a la otra, donde se puede ver reflejada la disminución de los picos de potencia al implementar las nuevas propuestas.

Para este análisis comparativo se tendrá en cuenta la respuesta del sistema en presencia de perturbaciones, considerando en ambas configuraciones de PSS el valor óptimo de ganancia igual a 30. Se pudo notar que para tales condiciones de operación se presentó un pico máximo de potencia igual a 462MW en la configuración Delta w, mientras que para las propuestas de PSS's Globales planteadas se obtuvieron valores pico de potencia iguales a 421MW y 428MW respectivamente antes de estabilizarse el sistema, por lo cual se logra verificar experimentalmente el correcto funcionamiento de las dos nuevas configuraciones de *power systems stabilizers* que se propusieron y la disminución del pico de potencia transferida entre áreas, obteniendo un $\Delta P_{\text{pico}}=41\text{MW}$ en el caso de la propuesta de PSS Global 1, que podría evitar la activación innecesaria de las protecciones ante diferentes tipos de fallas, implicando un aumento en la confiabilidad del sistema.

5. Conclusiones

Las alternativas propuestas permiten reproducir los modos de oscilación que se tendrían en sistemas de potencia interconectados, para los cuales siempre es necesario tomar decisiones de control adecuadas, que ayuden a mitigar el efecto de las oscilaciones inter áreas debidas a perturbaciones y los picos de potencia que se presenten, por lo tanto es importante notar el impacto que tienen los estabilizadores con esquema de control global ante la ocurrencia de fallas en el sistema.

Se verificó por medio del control adecuado del sistema de prueba presentado que la propuesta de control planteada es una herramienta capaz de enfrentar inestabilidades y comportamientos oscilatorios entre áreas del sistema eléctrico de potencia del país, demostrando así la robustez del controlador frente a incrementos considerables del flujo de potencia entre áreas después de ocurrida una perturbación.

Se tuvo una reducción significativa en los picos de potencia transmitida entre las dos áreas del sistema de prueba planteado que se presentaron en presencia de perturbaciones al utilizar la propuesta de control global con respecto a la estrategia clásica Delta-w, disminuyendo aproximadamente 41MW de valor pico alcanzado. Lo anterior es prometedor puesto a que se muestra como una alternativa de solución a un problema que se tiene actualmente en los sistemas de potencia interconectados, reduciendo la posibilidad de activación innecesaria de las protecciones y realizando un aporte significativo a la confiabilidad del sistema.

Para la construcción de las 2 alternativas con esquema de control global se implementó un diseño con 4 constantes y otro con 2, lo cual permitió notar el impacto que tienen dichas constantes en el controlador, ofreciendo una mayor capacidad de respuesta.

Los 2 controladores planteados se presentan como los candidatos adecuados para disminuir los picos de potencia transferida al igual que las oscilaciones entre áreas que se presenten en un sistema de potencia interconectado. Cabe notar que la propuesta también tendría una fundamentación tecnológica basada en los Sistemas de Medición y Control de Área Amplia (WAMS) y Medición Fasorial que se tengan en la actualidad, los cuales permitirían implementar estructuras de control que adquieran información remota de diferentes partes del sistema, logrando así una mayor cobertura y capacidad de intervención sobre el sistema de potencia interconectado.

Las propuestas planteadas en la presente tesis abre un camino de investigación en varios aspectos relacionados con técnicas de ajuste de *Power systems stabilizers* con esquemas de control global que permitan mitigar los picos de potencia y oscilaciones inter áreas, al igual que incentiva mejorar la implementación de la estrategia de control propuesta.

Aunque la propuesta se implementó sobre el sistema de prueba planteado en el Kundur [9], Los resultados obtenidos podrían servir como soporte a la unidad de planeación minero energética (UPME) para la toma de decisiones al momento de realizar la planeación del control de generación del sistema interconectado nacional. Por lo cual se sugiere continuar con la investigación de alternativas de PSS's que ayuden a mitigar el impacto de las

oscilaciones inter áreas que se presentan en el sistema eléctrico de potencia colombiano, ya que es notable el impacto que podrían tener este tipo de controladores en la estabilidad transitoria del mismo.

La implementación del sistema de control planteado podría representar una disminución considerable en los picos de potencia que se presentan en todo el sistema eléctrico de potencia nacional ante la presencia de perturbaciones, lo cual se puede traducir en beneficios económicos.

Anexo: Sistema de Potencia de 2 Áreas – 4 Generadores [Kundur]

A continuación se detallan los parámetros del sistema original de 2 Áreas - 4 Generadores. Cabe notar que dicho sistema fue modificado levemente hasta obtener el modelo que se utilizó en el caso de estudio. Los parámetros del sistema original también se encuentran en [9, 17]. El sistema consiste de dos áreas simétricas interconectadas por dos líneas de transmisión de 230 kV. En cada área hay dos generadores sincrónicos con su respectivo transformador de generación y una carga RLC.

Parámetros del Generador

Los cuatro generadores tienen los mismos parámetros originales, los cuales se presentan en la Tabla 1. Cada generador tiene cuatro pares de polos, la potencia y el voltaje nominal es de 900 MVA y 20 kV respectivamente y se asume un factor de fricción igual a cero.

$X_d = 1,8 \text{ pu}$	$X_q = 1,7 \text{ pu}$	$X_l = 0,2 \text{ pu}$	$X_d' = 0,3 \text{ pu}$
$X_q' = 0,55 \text{ pu}$	$X_d'' = 0,25 \text{ pu}$	$X_q'' = 0,25 \text{ pu}$	$R_a = 0,0025 \text{ pu}$
$T_{d0'} = 8s$	$T_{q0'} = 0,4 \text{ s}$	$T_{d0''} = 0,03s$	$T_{q0''} = 0,05s$
$H = 6,5s \text{ (G1 y G2)}$	$H = 6,175s \text{ (G3 y G4)}$		

Tabla 1. Parámetros del Generador [9]

Parámetros del Transformador

Cada transformador tiene una impedancia de $0 + j0,15 \text{ p.u}$ en una base de 900 MVA y 20/230kV.

Parámetros de la Línea de Trasmisión

El voltaje nominal del sistema de transmisión es 230 kV. La longitud de cada tramo de línea del sistema completo se presenta en la Figura 1. Específicamente, la longitud de cada línea de interconexión entre las dos áreas es de 220 Km. Los parámetros de las líneas en una base de 100 MVA y 230 kV son: $r = 0,0001 \text{ p.u/Km}$, $x_L = 0,001 \text{ p.u/Km}$ y $b_C = 0,00175 \text{ p.u/Km}$.

Parámetros de la Carga

Las características de la carga RLC de cada área se presentan en la Tabla 2.

Área 1	$P_L=967 \text{ MW}$	$Q_L=100 \text{ MVar}$	$Q_C=200 \text{ MVar}$
Área 2	$P_L=1767 \text{ MW}$	$Q_L=100 \text{ MVar}$	$Q_C=350 \text{ MVar}$

Tabla 2. Característica de las Cargas del Sistema [9]

Bibliografía

- [1] *IEEE Working Group on System Oscillations, "Inter-area oscillations in power systems," IEEE Special Publication, 95-TP-101-1995.*
- [2] *M. E. Aboul-Ela, A. A. Saltam, J. D. McCalley, and A. A. Fouad, "Damping controller design for power system oscillations using global signals," IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRS-11, no. 2, pp. 767–773, 1996.*
- [3] *Wide-area Damping Control for Inter-area Oscillations: A Comprehensive Review by Mohamed Ramadan*
- [4] *J. Ma, T. Wang, Z. Wang and J. S. Thorp, "Adaptive Damping Control of Inter-Area Oscillations Based on Federated Kalman Filter Using Wide Area Signals," IEEE Transactions on Power Systems, to be Published.*
- [5] *G. Rogers, Power system oscillations, Kluwer Academic, 2000.*
- [6] *M. Parsa and J. Toyoda, "Implementation of a hybrid power system Stabilizer," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, no. 4, pp. 1463- 1469, 1989*
- [7] *G. J. Rogers, "The application of power system stabilizers to a multigenerator plant," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 350-355, 2000.*
- [8] *N. Yang, Q. Liu and J.D. McCalley, "TCSC controller design for damping interarea oscillations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1304-1310, 1998.*
- [9] *P. Kundur, power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994.*
- [10] *H. Wu, K. Tsakalis, and G. Heydt, "Evaluation of Time Delay Effects to Wide-Area Power System Stabilizer Design", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, n° 4, pp. 1935-1941, 2004.*
- [11] *2007 - SINTONIZACIÓN DE PSS's DE TECNOLOGÍA MULTIBANDA PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE SISTEMAS INTERCONECTADOS*
- [12] *Tesis Maestría nacional Oscilaciones- Andrea Ángel Zea.*
- [13] *Roth, A. ; Taborda, J. MBPSS Software Description. ABB Switzerland Ltd. 2002.*
- [14] *D. Bailey and E. Wright, Practical Scada for Industri, vol. 1 Burlington: Newnes, 2003.*
- [15] *Diego Gonzalez. Control robusto de Oscilaciones en Sistemas de Potencia mediante Señales Remotas*

[16] A. Snyder, D. Ivanescu, N. Hadjsaid, D. Georges, and T. Margotin, “Delayed-input wide-area stability control with synchronized phasor measurements and linear matrix inequalities”, in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, 2000*.

[17] KLEIN, M. ; ROGERS, G. J. ; MOORTY, S. ; KUNDUR, P.: Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance. En: *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 7 (1992), September, Nr. 3, p. 382 -390. –ISSN 0885-8969.